

GB21-2, 3 トカラ列島周辺海域におけるマルチビーム測深器による観測の概要

高下 裕章^{1,*}・佐藤 太一¹・鈴木 克明¹

KOGE Hiroaki, SATO Taichi and SUZUKI Yoshiaki (2023) Results of the multibeam echo sounder observations on the GB21-2,3 cruises (around Tokara Islands). *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 193-202, 7 figs and 1 table.

Abstract: The high-resolution bathymetry was observed using Multibeam echosounder (MBES) as a part of an ongoing seafloor mapping around Tokara Islands, a region from latitude 28°45' N to 31°15' N, and longitude 128°50' E to 131°20' E. The bathymetry map indicates that several bathymetric highs such as Hiki Sone, Minami-Gama Sone, Gon Sone, and Tairashima Sone, are part of a continuous ridge-like feature and possibly is located on the edge of the Okinawa Trough. The backscatter intensities are relatively high around Kuchinoshima, Nakanoshima, Gajashima, Kogajajima, Suwanosejima islands, and Hiki Sone, which suggest the presence of volcanic collapse depositions around them. Such high-backscatter intensities are also shown around Akusekijima and Tairashima islands suggesting distribution of volcanic collapse depositions, too. The result indicates that volcanic activities accompanied by volcanic collapses is common along the volcanic fronts of the Tokara Islands.

Keywords: Tokara Islands, Okinawa Trough, Bathymetry, Volcanoclastic material, Backscatter strength

要 旨

トカラ列島周辺海域の、北緯28度45分から北緯31度15分、及び東経128度50分から東経131度20分の範囲において、海域地質図作成を目的としたマルチビーム音響測深装置 (MBES) を用いる航走観測を実施し、高解像度海底地形データ及び後方散乱強度データを取得し解析した。統合した地形からは、当該海域に含まれる特徴的なリッジ状の地形が、ひきそね 碁曾根・みなみがま 南碁曾根・ごんそね 権曾根・たいらしま 平島曾根を含む一連の高まりを形成し、その位置は沖縄トラフと島弧の境界に相当することが示唆された。後方散乱強度は、くちのしま 口之島、なかのしま 中之島、がじゃじま 臥蛇島・こがじゃじま 小臥蛇島、すわのせ 諏訪之瀬島、及び碁曾根周辺で高く、広く火山砕屑物が海底面を覆っている可能性が示唆された。同様に高い後方散乱強度分布はあくせきじま 悪石島、たいらしま 平島周辺でも見られることから、トカラ列島の火山フロント部では、広域に海底を覆う崩壊を伴う火山活動があった可能性が示唆された。

1. はじめに

GB21-2, 3 調査航海では主としてトカラ列島周辺海域の北緯28度45分から北緯31度15分及び東経128度50分から東経131度20分の範囲においてマルチビーム音響測深装置 (MBES) による海底地形航走観測を実施した。第

1図に本年度調査が行われた調査航海の全測線図を示す。本報告書では、測深データの取得方法・データ処理・処理結果の報告と、得られた結果に基づく調査海域の海底地形の記載と予察的解釈を記す。また、海底地形データと同時に取得された後方散乱強度分布についても報告する。

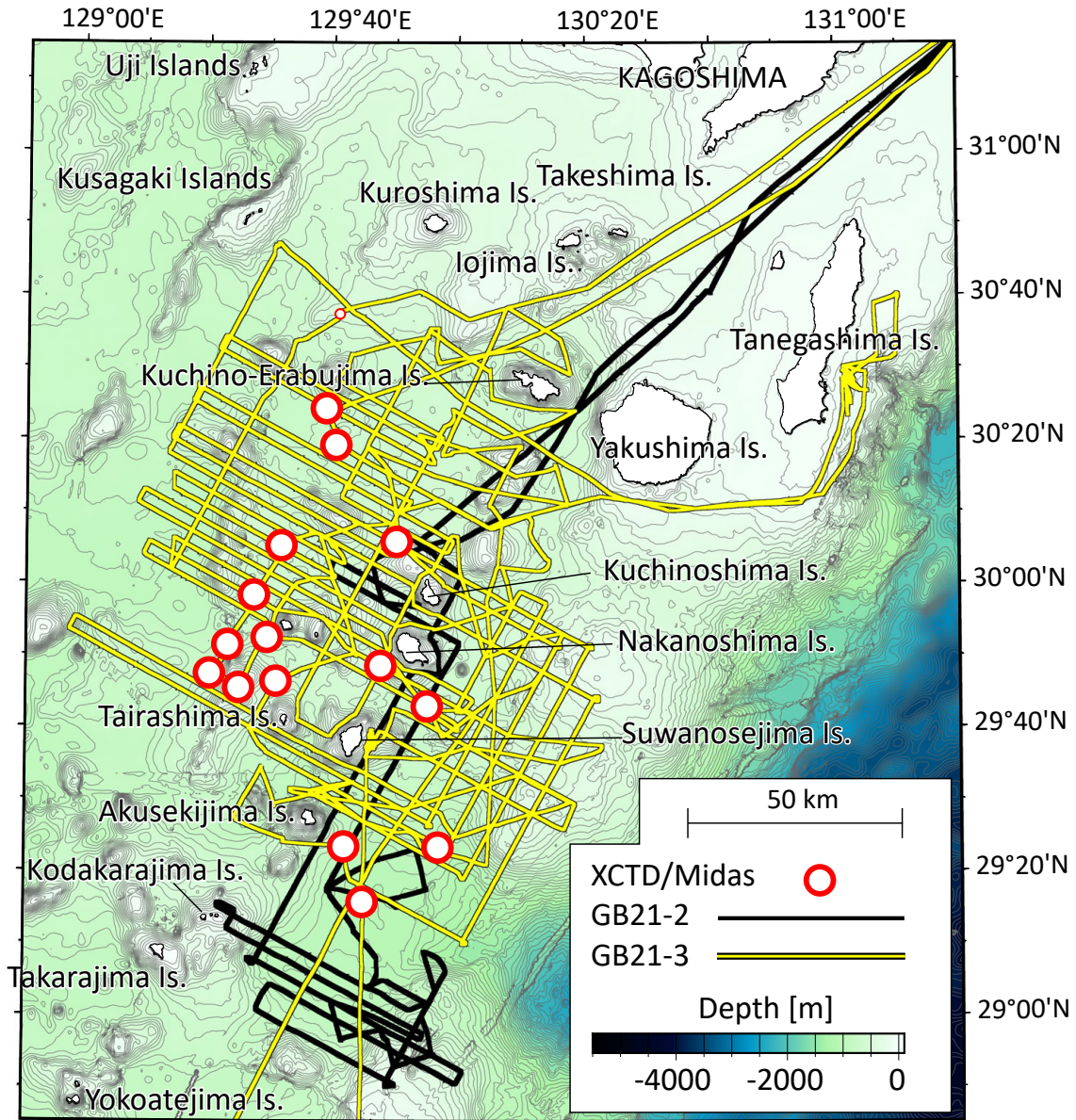
2. 装置及びデータ処理

これまで行われてきたトカラ列島の調査航海に続き、GB21-2, 3 調査航海では、東海大学所有の海洋調査研修船「望星丸」に搭載されている観測機器 (高下ほか, 2022) を使用した。同海域では同大学所有の練習船「神鷹丸」によるGS21航海でもマルチビーム音響測深を試みたが、マルチビーム測深器の不調によりデータを得られなかったので本書には含めない。

望星丸は全長87.98 m, 全幅12.80 mで、船体のヘディングはMBES専用のアンテナによるGPSコンパス機能により、ロール・ピッチ・ヒープはMRU 5+MKII (動揺センサー) により、それぞれ観測した。本観測航海を含む、2020年4月以降に実施された全ての観測航海では、日本の海域では準天頂測位衛星みちびきのLIS信号によるサブメートルスケールの測位が可能であり、みちびきの配信するSBAS信号を受信することで測位精度を維持して

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

* Corresponding author: KOGE H., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: koge.h@aist.go.jp



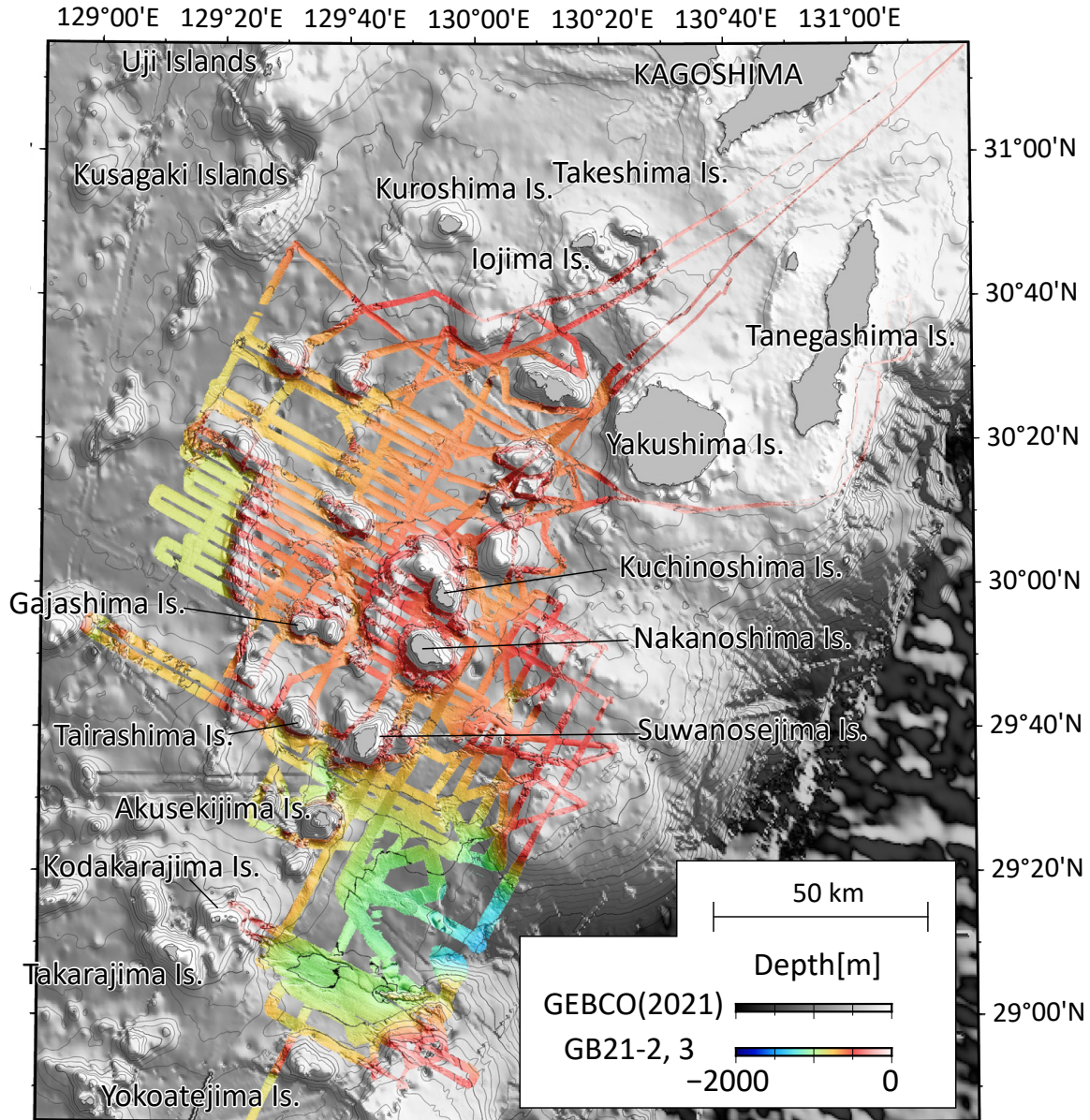
第1図 GB21-2, 3航海の調査海域及び測線図。黒色実線はGB21-2を、黄色実線はGB21-3航海測線を表す。赤丸は音速度観測を行った箇所を表す。地形はGEBCO Compilation Group (2021)による15秒統合グリッドを使用した。

Fig.1 Survey area and Track lines of the GB21-2, 3 cruises. The solid black line represents the GB21-2 and the yellow line represents the GB21-3. The red circles indicate the locations of the sound velocity observations. Bathymetry data was used the arc-15 sec integrated grid (GEBCO Compilation Group, 2021).

いる。船体動揺データはSeapath380-5+ (船体動揺船首方位測定装置：以下Seapath)により取得し、測位情報と統合した。

調査船の船底音速 (表面音速)は、音響ビームを望む方向に放射するために重要である。望星丸では船底から機関室に海水を汲み上げて循環させるタイムオブフライト方式の音速度センサー (Applied Microsystems Ltd.社製Micro X, SV-Xcharge)により、リアルタイムで船底音速度 (精度：±0.025 ~ 0.50 m/s)を観測した。観測され

た音速度値は望星丸搭載のMBES (EM302, Kongsberg社製、周波数30kHz)に入力した。取得されたデータに対して、CARIS社製のソフトウェアHIPS & SIPS 11.4.3を用いて、音速度・船体動揺・船体位置データに基づく水深値の再計算とエラーデータの除去を施した。再計算・再処理された海底地形データは緯度・経度・深度のアスキーファイル出力を行い、GMT (Generic Mapping Tools ver. 6; Wessel *et al.*, 2019)のnearneighborアルゴリズムにより、水深40 ~ 1,400 mである本調査海域において、グリッド



第2図 GB21-2, 3航海で取得した海底地形図. グリッド間隔は50 mである. 背景にグレースケールでGEBCO Compilation Group (2021)による15秒統合グリッドを表示した.

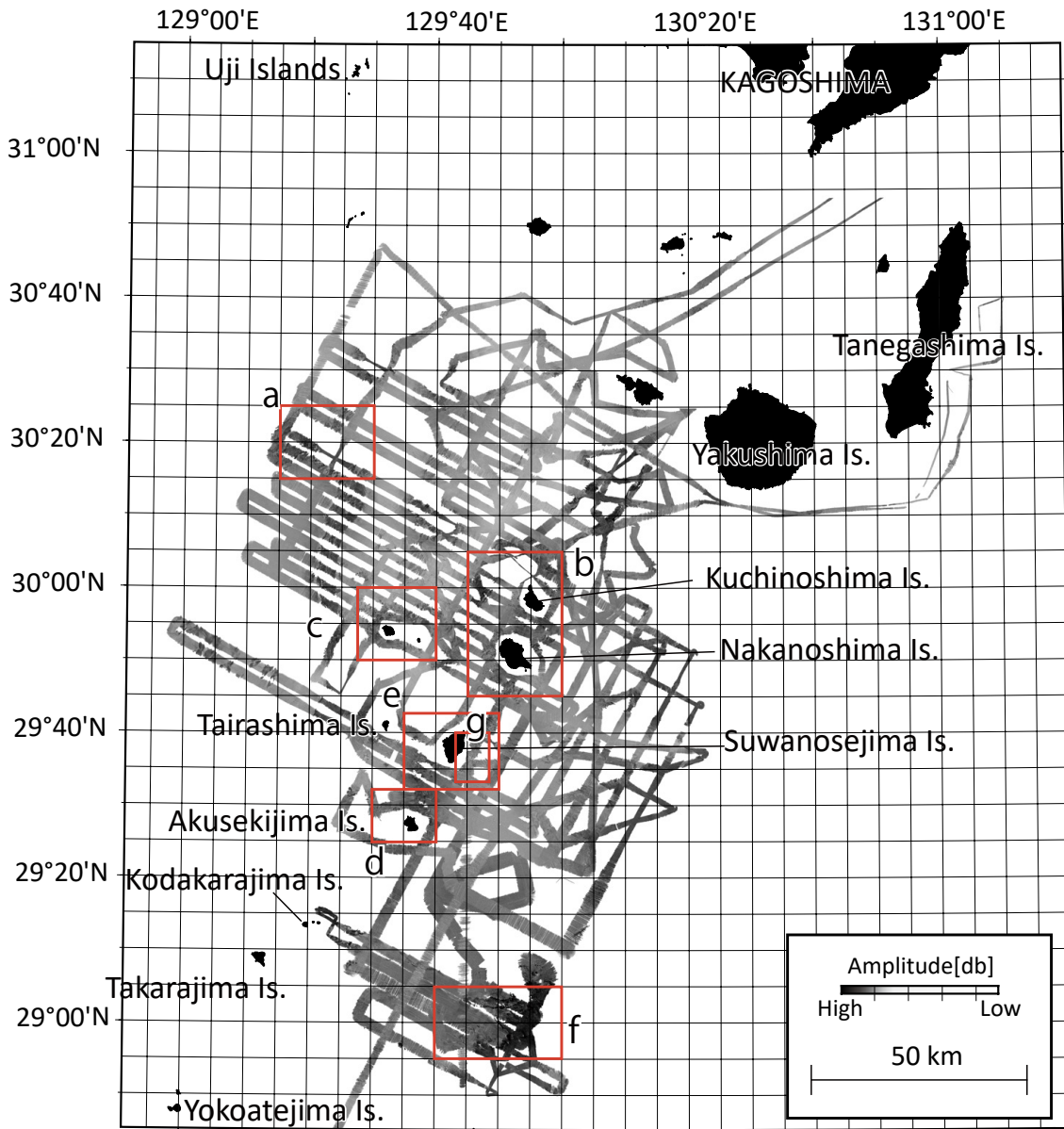
Fig.2 The cleaned bathymetry of GB21-2, 3. Grid space is 50 m. In the background, the arc-15 sec integrated grid (GEBCO Compilation Group, 2021) is drawn in gray scale.

間隔50 mの地形データを作成した(第2図).

海底地形データと同時に取得された後方散乱強度データの処理には, CARIS社のHIPS & SIPS 11.4.3を用いて, 初めに望星丸のビームパターンを計算し, 次にSIPS BackScatter (WMA with Area based AVG)によりグリッド間隔20 mのデータを作成した. これによって, 異なる海況や, 船などにより得られる絶対値が変化する後方散乱強度をある程度規格化して扱うことを可能にした. 本処理で出力したデータはGMTを用いて後方散乱強度分布図を作成した(第3図). なお, 後方散乱強度は観測原理

上, 海底地形データより高解像度のデータを取得するため, より細かいグリッドを作成することができる. 今回20 mグリッドとしたのは, 全域のデータを計算するために用いた計算機性能上の制限のためであって, 狭い範囲に限定すれば, 例えば1 mグリッドなどを作成すること可能であった(第6図).

マルチビーム測深器を含む音波を使用する観測は, 音源から放出された音波が, 海底などの反射面に到達して戻るまでにかかる時間(往復走時)を観測している. 音波の移動経路に沿う音速の推定値 (= 音速度プロファイ



第3図 GB21-2, 3航海で取得した後方散乱強度図。黒い場所ほど反射強度が強い。赤枠は第5, 6図で拡大図を示す箇所。

Fig.3 Backscatter image observed by the GB21-2, 3. The black suggests stronger reflection. The red frame indicates the focused image in Fig. 5 and 6.

ル)は、往復走時に基づいて距離に変換するために必要である。水中の音速度プロファイルは、XCTD (XCTD-4, 鶴見精機製), 及び産総研が所有する音速度計 (Midas MiniSVP, Valeport社製。以下Midasと省略)により、水深500~1,000 mまでの観測に基づいて作成した(第1表及び第4図)。XCTD観測は鶴見精機のデジタルコンバータTS-MK150Nに専用のハンドランチャを接続して同社のXCTD-4プローブ(最大観測深度:1,850 m)を装着し、航行する船舶の後方から海中にプローブを投入して計測す

る。XCTDプローブは電磁誘導型セルによる電気伝導度の観測を行う。鶴見精機のXCTDプローブの詳細についてはMizuno and Watanabe (1998)を参照されたい。XCTDによる観測は、同航海中に実施した曳航体(セシウム磁力計・エアガン・ストリーマケーブル)投入前後の低速航行時に、海況に応じて実施した。XCTDによる観測は、GB21-2航海とGB21-3航海でそれぞれ2回ずつ実施した。観測生データのサンプリング周波数は25 Hzであり、収録ソフトにより生データ(.RAWファイル)、全

トカラ列島周辺海域におけるマルチビーム観測概要（高下ほか）

第1表 GB21-2, 3 調査航海における音速度観測一覧.

Table.1 The list of sound velocity observations during GB21-2 and 3 cruises.

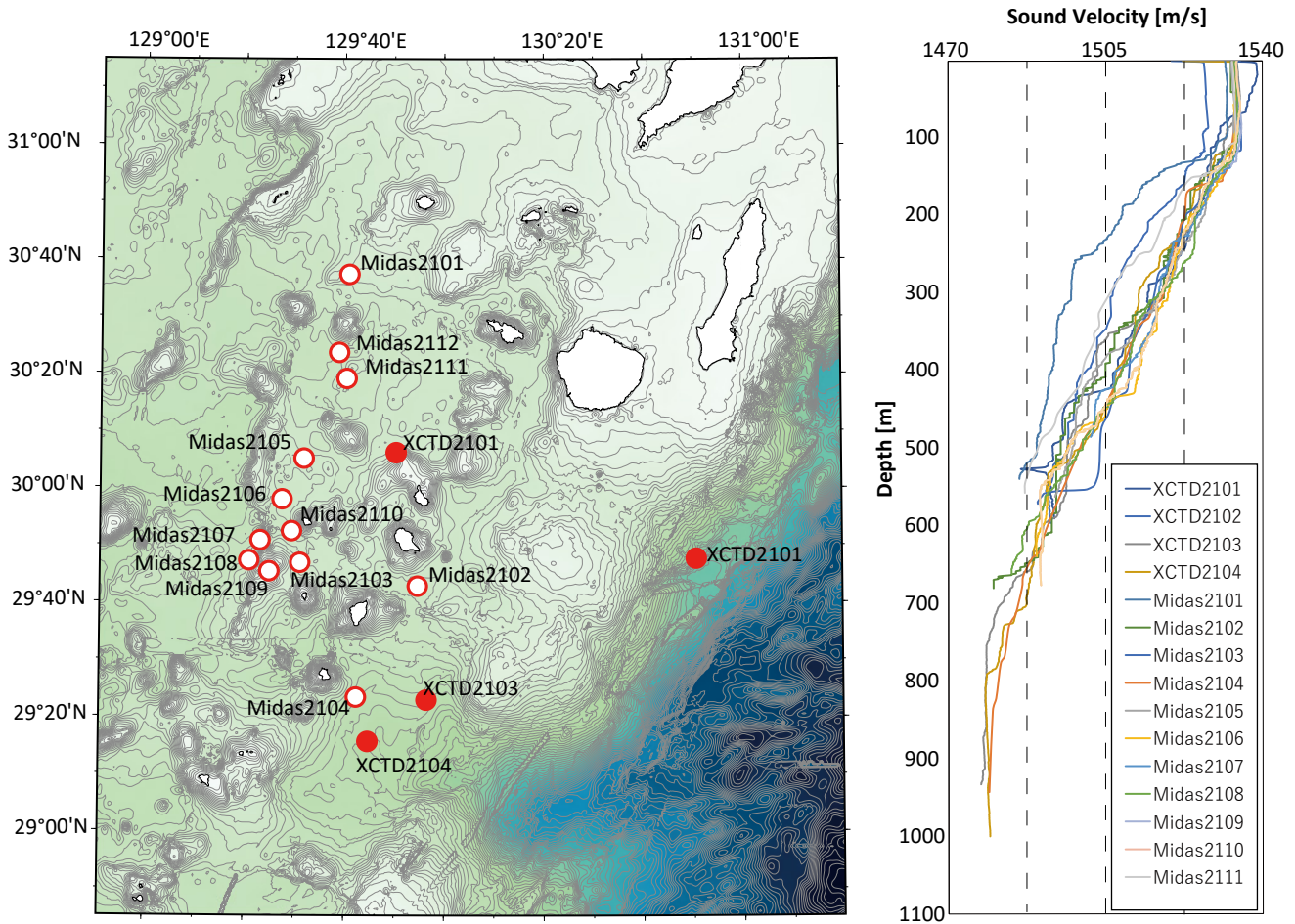
Name	Cruise	Date	Time(JST)	Latitude(N)	Longitude(E)	Depth(m)	Site (Sampling)
XCTD2101	GB21-2	2021/7/26	07:11:00	30°06.1456'	129°50.3500'	590	-
XCTD2102		2021/7/28	07:19:00	29°48.0000'	129°48.4166'	596	-
XCTD2103	GB21-3	2021/11/4	14:37:29	29°22.8868'	129°56.4442'	933	-
XCTD2104		2021/11/11	06:48:36	29°15.6333'	129°44.7000'	1000	-
Midas2101		2021/11/13	19:21:35	30°37.2985'	129°40.8755'	539	g356
Midas2102		2021/11/15	18:06:22	29°42.8066'	129°54.6632'	680	g199
Midas2103		2021/11/19	10:00:00	29°46.9059'	129°31.0792'	571	g245
Midas2104		2021/11/20	17:40:18	29°23.3909'	129°42.360'	943	g119
Midas2105		2021/11/21	09:53:22	30°05.1237'	129°31.8315'	562	g299
Midas2106		2021/11/21	11:22:35	29°57.9960'	129°27.4595'	639	g283
Midas2107		2021/11/21	12:51:35	29°50.8193'	129°23.0847'	485	g265
Midas2108		2021/11/21	13:54:01	29°47.3029'	129°20.8613'	662	g264
Midas2109		2021/11/21	14:50:41	29°45.3928'	129°24.9019'	136	g244
Midas2110		2021/11/21	16:02:12	29°52.4322'	129°29.3784'	676	g266
Midas2111		2021/11/24	11:49:48	30°19.0935'	129°40.4151'	557	g326
Midas2112		2021/11/24	13:04:47	30°23.6533'	129°38.8635'	676	g237

データ(CTDファイル)、深度1 m間隔データ(CTDファイル)に変換した3種類のデータを出力した。なお、電気伝導度から塩分への換算、深度の計算、音速度の計算には、それぞれの観測機器に付属のソフトウェアを用いた。Midasは表層採泥器として用いた木下式グラブ採泥器(K-グラブ)の側面フレーム内部に固定し、採泥器が通過する海水中の音速度を計測するものである。Midasによる計測はGB21-3航海で合計12回実施した。一般的なCTD観測では観測機器下降中の乱流の影響を避けるためにセンサーを下方に向けて固定し観測を行うが、センサー部を下のまま固定すると、K-グラブが転倒などした際にセンサー部が海底面に接触し、破損する可能性がある。そのため、本観測では破損を回避するために、Midasのセンサーを上向きで固定した。Midasの音速度センサーにはタイムオブフライト方式を採用しており、計測範囲は1,400 ~ 1,600 m/s、分解能は0.001 m/s、精度は±0.02 m/sである。音速度センサー部は、トランスデューサーから音響パルスを発振して反射板からトランスデューサーにまで戻るまでの時間を計測して、音速度を求める(同型機のウェブサイトを参照にここに載せる。https://www.valeport.co.uk/products/midas-svx2/)。電気伝導度計には電磁誘導式センサーを用いており、計測範囲は0 ~ 80 mS/cm、分解能は0.003 mS/cm、精度は±0.01 mS/cmである。温度計には白金測温抵抗高速センサーを用いており、計測範囲は-5 ~ 35 °C、分解能は0.001 °C、精度は±0.01 °Cである。圧力計にはピエゾ抵抗センサーを用いており、計測限界は600 Bar (約6,000 m)、分解

能は0.001%FSR、精度は±0.05%FSRである。観測に用いるセンサーには2022年3月にメーカーによる校正が行われた。機器の設定は制御用のソフトウェアDataLog Expressを用いた。GB21-3航海では、Midasによる全ての観測で連続測定モード(Continuous Mode, 8 Hz)で観測を行った。圧力センサーの出力は圧力と深度から選択可能であるところ、本航海では深度を選択した。本報告書では深度1 m毎の平均値を計算して解析に用いた。第4図に得られた音速度プロファイルをまとめた。Midasによる音速プロファイルは一般的なCTDのオペレーションに倣い、上昇時のデータは使用していない(高下ほか, 2022)。

本報告で示した海底地形図は以上の観測データに加えて、同等の精度で取得した既存のGH11航海のデータ(佐藤・小田, 2014)にGK20, GB21-1航海のデータ(高下ほか, 2022)をGMTのgrdblendコマンドにて統合して作成した(第7図)。

grdblendコマンドでは測線が重複している場合には、加重平均法に基づき航海ごとの重み付けが出来る。例えば、音速度を頻繁に求めた航海のデータや、海況が穏やかで波浪の影響が大きくなかった航海のデータがあれば、それらに重みを置いて統合することも有効と思われる。ただし広域データを統合する際に異なるUTMゾーンを含む場合には、処理内で座標変換がうまくいかず大きく座標がずれることがある。そのため、同じ座標系同士で一度データを切り取って合成するなどの手順を踏むことが必要である。本航海のデータ及び過去の航海データ



第4図 GB21-2, 3航海の音速度観測から得た海中音速度プロファイルとその観測位置. XCTDを赤丸, Midasを白抜き赤丸で示す. 地形はGEBCO Compilation Group (2021)による15秒統合グリッドを使用した.

Fig.4 Sound velocity profiles obtained at GB21-2, 3 and the index map. A red circle indicates XCTD observations, and a white filled circle indicates Midas observations. Bathymetry data was used the arc-15 sec integrated grid (GEBCO Compilation Group, 2021).

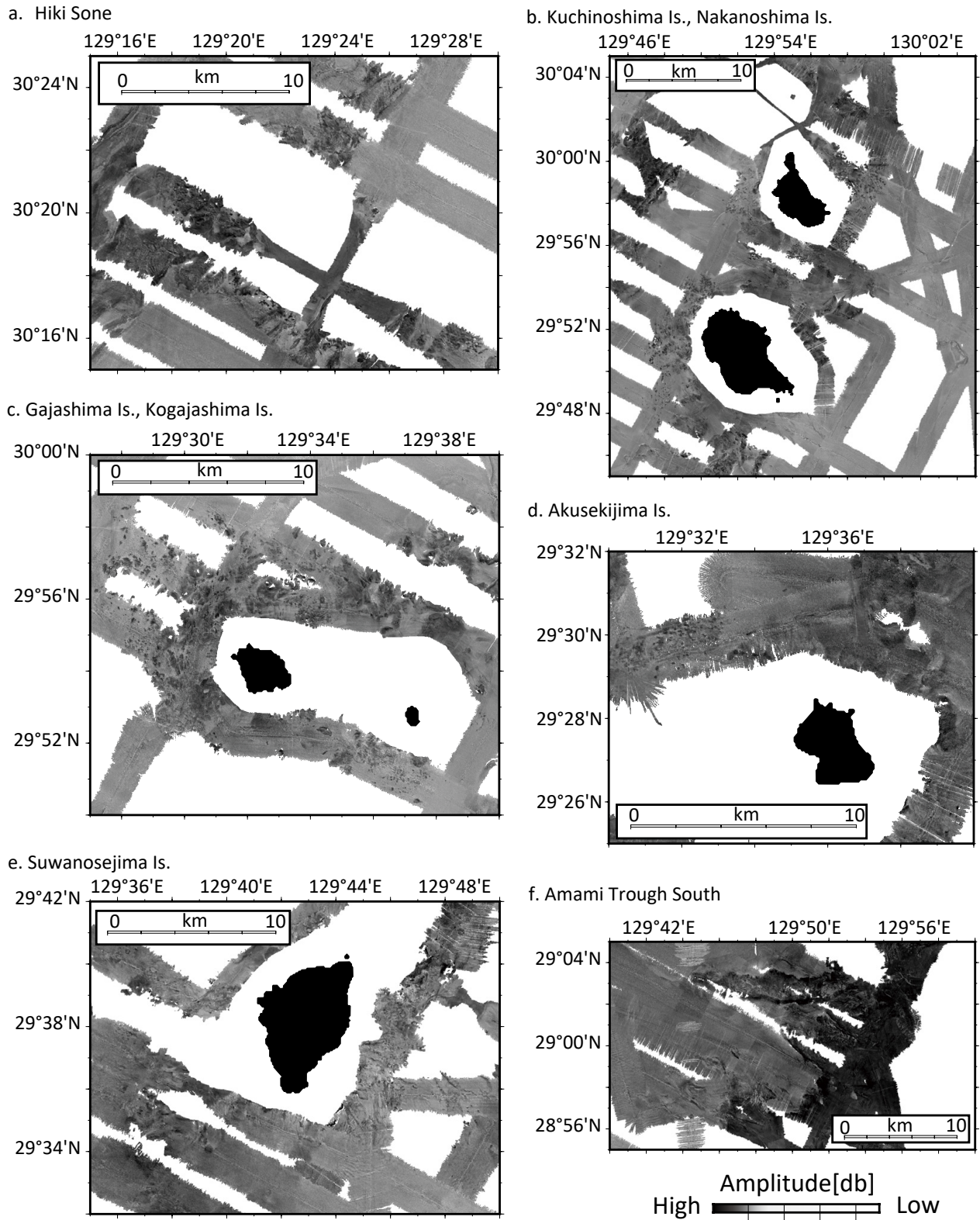
は、基本的にすべてKongsberg社製のEMシリーズで取得されたものであり、データの品質差が顕著ではなかったため、重みづけは用いずに統合した。

3. 観測結果

音速度プロファイルは、海面から100から150 m程度の表面混合層を持つ。GB21-3航海の日ごとのデータを比較すると、Midas2101のみ音速度が全体的に遅い傾向が得られた。黒潮と大陸河川の影響を複雑に受ける海域なので原因の考察は難しい。

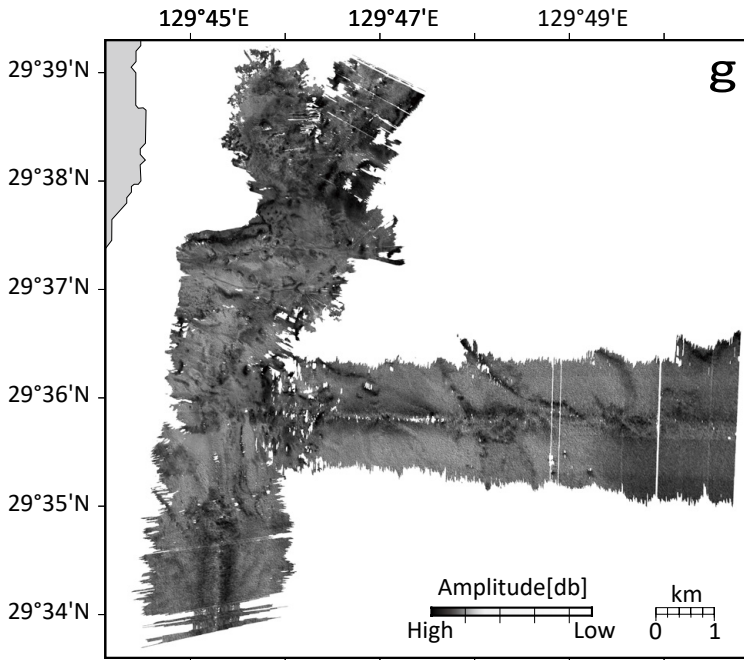
統合地形データを第7図に示す。調査海域の地理的呼称は海上保安庁のホームページ「海しる」で公開されている海底地形名レイヤに記載された地名を参照・使用した(海上保安庁, 2022)。まず、水深は十島村の島々で構成される北東方向に連続する島弧を中心に西側の沖縄トラフ及び東側の琉球海溝へ向かい増加する傾向にある。第7図に示すトラフ側(緯度29°40' N-30°40' N, 経度129°

E-130° E)を見ると、今回新たに得られた地形では暮曾根・南暮曾根・権曾根・平島曾根で連続するリッジ状の地形の高まりが形成されており、それを扶んで西側では平坦面が広がっていることが明瞭に示された。さらに西には、平坦面の中の地形的高まりとして臥蛇海丘が存在する。第7図の海溝側(緯度28°45' N-29°40' N, 経度129°20' E-130°20' E)では、トカラ海底谷に向かって水深が全体的に深くなるような、すり鉢状の地形を示す。奄美舟状海盆の中、水深1,200 mの部分でコンターに沿ったチャンネルのような凹地形が幅800 m比高100 m(第7図中矢印A)が形成されている。ただし、連続性が低く海盆の可能性も考えられる。ほかのチャンネルのような構造として1000 m部分のコンターが細かく切れている箇所や(第7図中矢印B)、南海トラフや他の沈み込み帯で一般的に見られる明瞭な海底谷(例えば少し北にある中種子海底谷など)が第7図中矢印C(幅1,500 m, 比高100 m)などにみられた。



第5図 GB21-2, 3航海で取得した後方散乱強度図の拡大図。黒い場所ほど後方散乱強度が強い。

Fig.5 Focused backscatter image observed by the GB21-2, 3. The darker color indicates stronger reflection.



第6図 GB21-3航海で取得した1 mグリッドの後方散乱強度図の拡大図。第3図におけるgに対応。黒い場所ほど後方散乱強度が強い。

Fig.6 1 m gridded backscatter image obtained on the GB21-3 cruises corresponds to g in Fig. 3. The darker color indicates stronger reflection.

後方散乱強度については第3図を基に概略を記す。第3図を拡大し、第5図で観察すると、2020年度調査(高下ほか, 2022)にて悪石島や平島の周辺の海底で見つかった、後方散乱強度の小さな海底面に後方散乱強度が相対的に大きな直径50～300 m程度の不定形の領域が200 m程度の間隔で点在するごま塩状のファシス(白黒入り乱れた斑状の平面的広がりのことを指す)が、口之島、中之島、臥蛇島・小臥蛇島、諏訪之瀬島、藁曾根の周辺で見つかった(第5図)。島ごとに、このごま塩状のファシスの分布範囲は異なっており、例えば諏訪之瀬島周辺では島の東側に偏る一方で、臥蛇島・小臥蛇島周辺では島の西側にその偏りを持つ。また、これらとは異なり、広範囲で強い後方散乱強度を示す箇所がトカラ海底谷南側の奄美海脚上(緯度29°N経度129°50'E付近)に見られた。ここでは東西方向に2本の線状構造(長さ～13 km)も観察される。

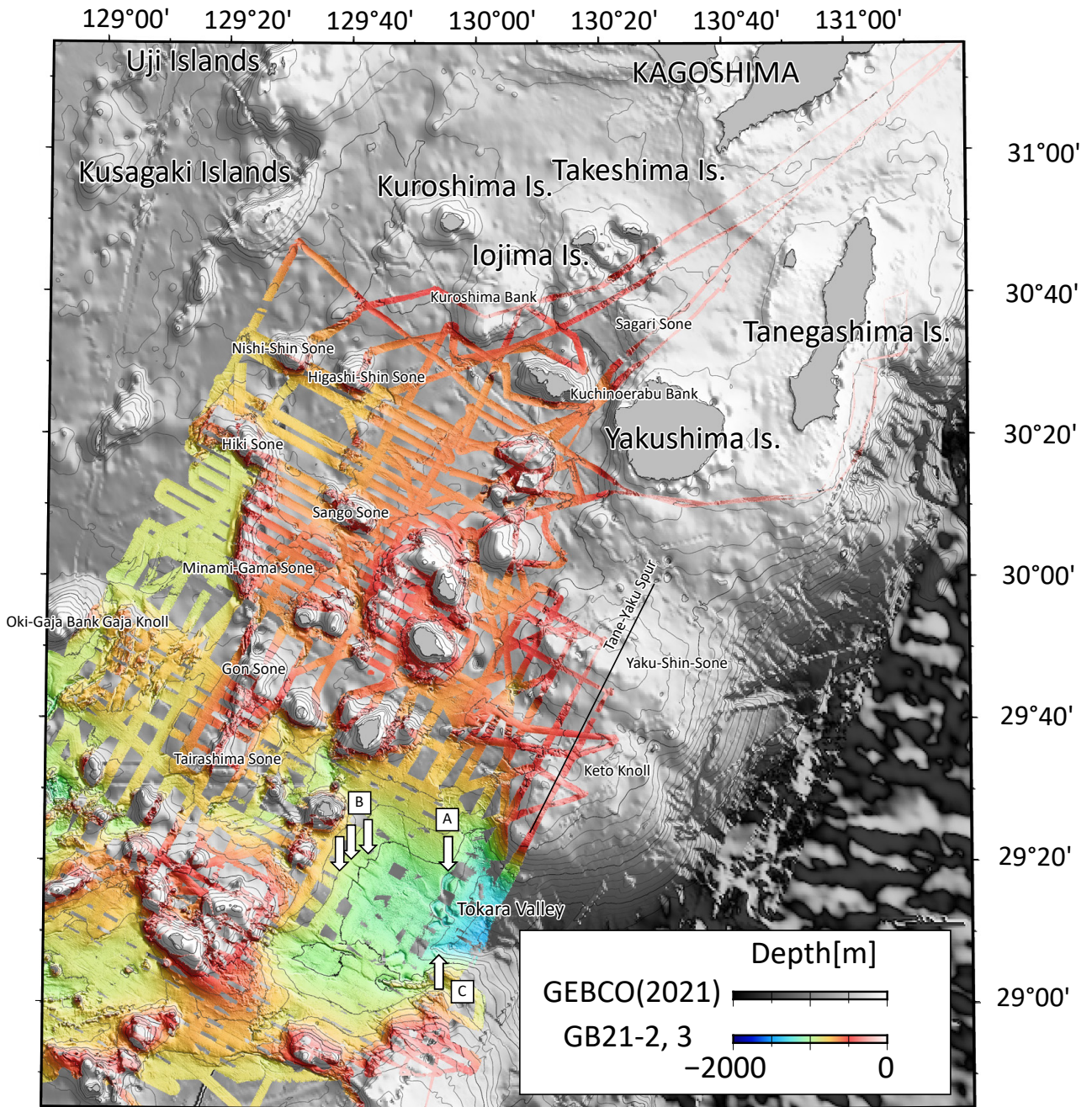
4. 考察

地形補正に用いるために取得した海水の音速度プロファイルは、一般に、温度・塩分及び圧力によって支配される。Schmidt *et al.* (2006)によると一般的な音速度プロファイルでは、海面波浪の作用による表層水の混合により、海面から水深数十メートルまで等速層が示される。この層は表面混合層と呼ばれる(例えば気象庁, 閲覧日: 2022年9月30日)。その下には、季節変性の温度躍層及び水塊構造に応じたより大きな温度躍層が存在し、音速度はこの区間では温度の低下と同調して減少する。これらの温度躍層より深い水深では、温度変化が少なくなり、圧力上昇影響が支配的になる。そのため、一定の深度を

超えると水深に依存する値へと変化する。しかし、今回観測したプロファイルはこうした一般的な音速度プロファイルと様相が異なり、海面から100から150 m程度の表面混合層を持つことが明らかになった。東シナ海は長江、黄河など大陸河川から供給される多量の淡水の影響下にあることが知られており(Kubota *et al.*, 2015)、本海域ではそれと同時に黒潮の影響も受けていることが考えられる。本航海で観測された表面混合層の成因については、CTDのデータなども組み合わせる議論が必要となる。

GB21-1航海で得られた地形では、平島・臥蛇島の西北西方向(N24°E)に比高100 m程度の西落ちの崖が連続して存在している(高下ほか, 2022)。これと同様に、藁曾根・南藁曾根・権曾根・平島曾根で連続するリッジ状の地形的高まりが存在するが、Minami *et al.* (2022)では沖縄トラフのouter trough内の構造と考えられている。これより西方の平坦面に現れる臥蛇海丘は、磁気異常の観測結果から(佐藤・高下, 2023)、その成因が火山性ではない可能性が高い。隣の沖臥蛇堆もまた、過去にとられた広域の磁気異常の観測結果から(CCOP and GSJ, AIST, 2021)、火山性ではない可能性が高い。沖縄トラフ形成の影響と考えられるが詳細は不明である。

後方散乱強度は、発振した音波が観測対象にあたって跳ね返り、受振される際の強度を観測している。一般的に、観測機器に斜面が向いている場合と、海底表面が固い場合に大きな値を返す。したがって斜面の効果を除けば底質の違いを反映する値が得られるが(露岩は反射が強く、堆積物は弱い)、音響測深機は水深の変化に応じて適切な反射強度が得られるように発振強度を自動で調



第7図 GB21-2, 3航海にて取得されたMBESデータを過去のGH11, GK20, GB21-1航海のデータと統合したトカラ列島周辺海域の海底地形。グリッド間隔は50 mである。背景にグレースケールでGEBCO Compilation Group (2021)による15秒(およそ360 m)統合グリッドを表示した。矢印はチャネルのような凹地形 (A), コンターが細かく切れているチャネル状の構造 (B), 及び海底谷 (C)。

Fig.7 The 50 m gridded bathymetry color map integrating GB21-2, GB21-3, GH11, GK20, and GB21-1 cruises. The background is a grayscale bathymetry map gridded at 15 arc seconds (GEBCO Compilation Group, 2021). The arrows indicate channel-like depressions (A), channel-like structures with fine contours (B), and submarine canyons (C).

整する場合が多いので、一様に値だけを比較して判断することは出来ない。また水深の変化だけでなく、観測で使用了船上装置の船ごとに値を算出する基準が異なることや、さらに海況にも発振強度は大きく影響を受けるので、同一箇所であっても違う値を示すことも一般的である。異なる環境で取得した複数の後方散乱強度値を統合すると、人工的な段差ができることも多い(高下ほか, 2022)。今回は望星丸EM302のビームパターンを計算した後に、SIPS BackScatter (WMA with Area based AVG)で全体の後方散乱強度を計算し、各航海及び測線間の数値を発振強度に依存しないよう規格化する試みを行った(第3図)。その結果、GB21-1航海で見られたような機械的アーチファクトが減少した。そのため、本処理は水深に変化が大きい海域で複数のデータを統合するにあたっては重要な処理であると考えられる。このような処理をおこなった結果、口之島、中之島、臥蛇島・小臥蛇島、諏訪之瀬島、暮曾根の周辺に見つかったテクスチャは、火山碎屑物が海底面付近に分布することを示す可能性が考えられる。諏訪之瀬島周辺では島の東側に、臥蛇島・小臥蛇島周辺では島の西側に偏りを持ち、トカラ海底谷南側の奄美海脚上では面的に見られた強い後方散乱強度の偏在は、火山性物質の噴出や山体崩壊などの地形制約による崩壊堆積物の偏在を表している可能性も高い。加えて、通常時の堆積物供給によって崩壊堆積物の一部または全部が覆い隠されている場合も考えられ、崩壊堆積物が偏在する実態や要因を後方散乱強度のみから特定することは難しい。ごま塩状のファシスが各島の周辺にそれぞれ観察されたことから、火山碎屑物がトカラ列島の火山フロント周辺の島及び海底火山周辺の海底面を広く覆っている可能性は示唆される。東西方向に観察された2本の線状構造の成因等詳細は現時点では不明である。

謝辞: 今回の調査では、望星丸の船長をはじめ、乗組員・運用士の方々、産総研リサーチアシスタントや乗船学生の方々、及び調査団の研究員の皆様には調査機器の運用やデータ記録に関してご尽力頂きました。望星丸における観測については、特に玉井隆章技術員、東海大学・佐藤悠介氏及び永井あすか氏、東京大学・山本一平氏の尽力により実現されました。また、査読者の方の有益なコメントにより、本稿は大幅に改善されました。皆様に篤く謝意を表します。

文献

- Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia and Geological Survey of Japan, AIST (2021) Magnetic Anomaly Map of East and Southeast Asia, Revised Version (3rd Edition), Digital Geoscience Map P-3, Revised. Geological Survey of Japan.
- GEBCO Compilation Group (2021) GEBCO 2021 Grid. doi:10.5285/c6612cbe-50b3-0cfe053-6c86abc09f8f
- 海上保安庁 (2022) 海しる, <https://www.msil.go.jp/msil/hm/topwindow.html> (閲覧日: 2022年9月30日)
- 気象庁 (2022) <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/knowledge/mixedlayer.html> (閲覧日: 2022年9月30日)
- 高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶 (2022) GB21-1及びGK20航海(トカラ列島周辺海域)における磁気異常観測の概要. 地質調査研究報告, **73**, 211–217.
- Kubota Y., Tada R. and Kimoto K. (2015) Changes in East Asian summer monsoon precipitation during the Holocene deduced from a freshwater flux reconstruction of the Changjiang (Yangtze River) based on the oxygen isotope mass balance in the northern East China Sea. *Climate of the Past*, **11**, 265–281.
- Mizuno, K., Watanabe, T. (1998) Preliminary results of in-situ XCTD/CTD comparison test. *Journal of Oceanography*, **54**, 373–380.
- QGIS.org (2022) QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org> (閲覧日: 2022年9月30日)
- 佐藤太一・小田啓邦 (2012) GH11航海(沖縄トラフ-東シナ海)海域の海底地形. 荒井晃作(編)「東シナ海沖縄トラフ海域の海洋地質学的研究」平成23年度研究概要報告書—北部沖縄トラフ海域—, 地質調査総合センター速報, no. 58, 19–28.
- 佐藤太一・高下裕章 (2023) GB21-2, GB21-3及びGS21航海(トカラ列島周辺海域)における磁気異常観測の概要. 地質調査研究報告, **74**, 203–209.
- Schmidt, V., Chayes, D., Caress, D. and Aquarium, M. B. (2006) The MB-System Cookbook. Revision, 1(2006), 02.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F. and Tian, D (2019) The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **20**, 5556–5564.

(受付: 2022年10月31日; 受理: 2023年9月11日)